DOI:10.11931/guihaia.gxzw201906035

不同温度条件下 PEG 模拟干旱胁迫对水杉种子萌发的影响

吴漫玲[2]，朱江[1,2*]，艾训儒[1 2]，姚兰[1,2]，黄小[2]，王进[2]，朱强[2]，陈绍林[3]

（1. 生物资源保护与利用湖北省重点实验室，湖北 恩施，445000；2. 湖北民族大学林学园艺学院，湖北 恩施，445000；3. 湖北星斗山国家级自然保护区，湖北 恩施，445000）

摘　要：水杉原生种群天然更新极差，林下鲜见幼苗和幼树，种子萌发率低是造成天然更新困难的重要因素，为探究其种子萌发率低的原因是否与水杉母树原生地春季低温有关，该文利用恒温培养箱设置三种恒温处理（15 ℃、20 ℃、25 ℃）和 1 种变温处理（12 ℃和 24 ℃，每 24 h 交替）；设置 5 种不同浓度的聚乙二醇（PEG-6000，0、5、10、15、20 g mL^{-1}）模拟干旱胁迫。结果表明：（1）实验所设置的温度对水杉种子萌发无显著影响（P>0.05），变温条件下的水杉种子平均发芽率和发芽势均为最高，分别为 46.75%和 21.25%；（2）不同浓度的 PEG-6000 溶液对其种子萌发产生显著影响（P<0.05），在水杉 15 ℃ 或 25 ℃ 下，低浓度的 PEG-6000 溶液（0~10 g mL^{-1}）对水杉种子的发芽势和发芽指数有促进作用，高浓度（>10 g mL^{-1}）的 PEG-6000 溶液对水杉种子的萌发有抑制作用，且浓度增大抑制作用也随之增强，直到浓度增大为 20 g mL^{-1} 时，水杉种子不再萌发。原生地春季低温并不是造成水杉原生种群天然更新困难的因素，适当的干旱胁迫有利于增强水杉种子发芽势和发芽指数，促使出苗整齐。

关键词：水杉，原生地春季低温，发芽率，发芽势，发芽指数

中图分类号：Q945.34　　　　　　　　**文献标识码**：A

Influences of simulating drought stress on seed germination of *Metasequoia glyptostroboides* under different temperature

Wu Manling[2], Zhu Jiang[1,2 *], Ai Xunru[1,2], Yao Lan[1,2], Huang Xiao[2], Wang Jin[2], Zhu Qiang[2], Chen Shaolin[3]

(1. *Key Laboratory of Biological Resources Protection and Utilization of Hubei Province*, Enshi 445000, Hubei, China; 2. *School of Foresty and Horticulture*, *Hubei University for Nationalities*, Enshi 445000, Hubei, China; 3. *Xingdoushan National Nature Reserve*, Enshi 445000, Hubei, China)

Abstract: The natural regeneration of the original mother trees of Metasequoia is very difficult. The seedlings and saplings ware rarely seen under the forest. The spring low temperature

基金项目：国家重点研发计划课题(2016YFC0503102) [National Key Research and Development Project(2016YFC0503102)]；生物资源保护与利用湖北省重点实验室开放基金项目（PKLHB1714）[Foundation of Hubei Key Laboratory of Biological Resources Protection and Utilization（PKLHB1714）]；湖北民族学院博士启动基金（MY2018B027）[PhD Research Startup Foundation of Hubei Minzu University（MY2018B027）]

作者简介：吴漫玲（1994-），女(土家族)，湖北利川人，硕士研究生，森林生态与生物多样性保护，(E-mail)248764858@qq.com。

通信作者：朱江，博士，讲师，森林生态与生物多样性保护，(E-mail)2017052@hbmy.edu.cn。

temperature in the original habitat of *Metasequoia glyptostroboides* is an important factor causing the difficulty of natural regeneration. To explore whether the reason for the low seed germination rate is related to the spring low temperature of the original species of Metasequoia. Use the constant temperature incubator to set three kinds of constant temperature treatment (15 ℃, 20 ℃, 25 ℃) and one kind of temperature change treatment (12 ℃ and 24 ℃, alternating every 24 h); set 5 different concentrations of polyethylene Alcohol (PEG-6000, 0, 5 g mL^{-1}, 10 g mL^{-1}, 15 g mL^{-1}, 20 g mL^{-1}) mimics drought stress. The results showed that: (1) The temperature set by the experiment had no significant effect on the germination of Metasequoia seed (P>0.05).The average germination rate and germination potential of Metasequoia seeds under variable temperature conditions were the highest, which were 46.75% and 21.25%, respectively; (2) Different concentrations of PEG-6000 solution had significant effects on seed germination (P< 0.05), at a temperature of 15 ℃ or 25 ℃, low concentration of PEG-6000 solution (0-10 g mL^{-1}) promoted the germination potential and germination index of Metasequoia seeds, high concentration (>10 g mL^{-1}) PEG-6000 solution inhibited the germination of Metasequoia seed, and the concentration increase inhibition also increased, until the concentration increased to 20 g mL-1, the Metasequoia seeds no longer germinated. The low temperature in the spring is not a factor that causes the natural regeneration of the original population of Metasequoia. The appropriate drought stress is beneficial to enhance the germination potential and germination index of Metasequoia seeds, and promote the emergence of seedlings.

Key words: *Metasequoia glyptostroboides*, spring low temperature, germination rate, germination energy, germination index

水杉（*Metasequoia glyptostroboides*）是我国著名的杉科孑遗植物，有植物界“活化石”之称，在《中国植物红皮书》中被列为一级保护植物，同时选列为《全国极小种群野生植物拯救保护工程规划（2011-2015 年）》优先保护的 120 种极小种群之一，在国际自然保护联盟（International Union for Conservation of Nature）濒危保护名录中被列为极危植物（IUCN 2018）。水杉原生母树年龄结构分配不均，呈现“倒金字塔型”，林下鲜见幼苗和幼树，天然更新困难（林勇等，2017），引种栽培区遗传多样性低，只有水杉原生种群保留着其最原始的基因库（崔敏燕，2011），原生水杉母树部分分布在人们的房前屋后，受人为活动干扰严重，种群处于衰退的状态。对水杉原生种群的保护一直受到国内的重视和世界的关注

（Chaney,1948；Fulling,1976；李媛媛，2006）。

繁殖是种群更新复壮的途径，有研究表明水杉种源限制是影响水杉天然更新困难的重要障碍因素（刘玉配，2015）。过去有学者研究过水杉种子发芽条件（廖邵忠等，1989；尤冬梅，2008；李淑娴等，2012）。辛霞等 2004 年研究水杉种子萌发的生理生态特性研究，发现水杉种子最适发芽温度为 24 ℃，因此认为水杉林下缺少幼苗可能与原生地春季温度过低有关（辛霞等，2004）。张岚研究地下水位、光照强度和种子的埋藏深度对水杉种子萌发和幼苗生长的影响，发现水杉种子适宜萌发水位为 0 cm，由此推测水杉原生地的地下水位太低可能是造成水杉种群天然更新困难的原因（张岚，2011）。众多学者对水杉天然更新困难的原因及水杉种子的萌发特性进行研究，但尚未就水杉原生地春季温度对水杉种子萌发的影响进行研究。因此，本研究针对水杉原生母树原生地春季（即水杉种子萌发和幼苗生长的季节）的温度情况，设置包含变温在内的 4 种不同温度条件和 5 种不同的 PEG-6000 溶液浓度模拟干旱胁迫梯度探究其对水杉种子萌发的影响，一方面可以验证水杉原生地春季低温是否是造成水杉种子萌发困难的原因，为水杉天然更新困难的障碍因素进行补充说明，另一方面结合干旱胁迫，探究在不同温度和水分情况下水杉种子的萌发指标，为人工繁育水杉技术做一些理论和实践参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验种子采自湖北省利川市忠路镇拱桥村原生水杉母树 1091 号，树龄 155 a，树高 37 m，胸径 94.6 cm，生长地理位置为 108°35'37.5″ E，30°07'9.9″ N，海拔 1 110 m。种子千粒重为 3.52 g。试验试剂为聚乙二醇（PEG-6000），化学药品为分析纯。试验仪器主要有超净工作台，JY3002 电子天平，YGZ-300F 恒温光照培养箱，冰箱等。

1.2 方法

1.2.1 种子采集与处理

2017 年 10 月份进行采种，采集球果后及时带回实验室阴干，等到球果完全裂开种子掉落后，将种子收集起来清理干净用密封袋封存放入 4 ℃ 冰箱冷藏备用（景丹龙等，2011）。

1.2.2 温度设置

结合水杉原生地春季温度变化范围约为 12~24 ℃，将变温设置为 12 h/12 ℃和 12 h/24 ℃，24 h 交替，辛霞等研究水杉种子萌发的生理生态变化，认为水杉种子萌发的最适

温度为 24 ℃（辛霞等，2014），郭秋菊等研究亚硒酸钠对水杉种子萌发的影响，结果显示水杉种子在 20、45 ℃蒸馏水浸种、全黑暗的条件下发芽率最高（郭秋菊等，2018）。因此认为水杉种子最适萌发温度为 20~25 ℃。本实验在此基础上，采用恒温箱设置恒温温度为 15、20、25℃。

1.2.3 溶液配制

配制 5 g mL^{-1} 浓度的聚乙二醇（PEG-6000）溶液时，使用电子天平称量聚乙二醇 5 g，放入烧杯中，加入纯水用玻璃棒搅拌直至试剂完全溶解，再次加入纯水定容至 100 mL。其他浓度溶液配制方法一致，共配制 5、10、15、20 g mL^{-1} 4 种浓度溶液。

1.2.4 实验方法

实验时采用四分法选取均一有代表性的种子，用 90 mm 透明塑料培养皿，使用前用 1‰的高锰酸钾消毒，纯水冲洗干净，放入 2 张 90 mm 滤纸，将种子均匀的放置其中，按照实验设计加入纯水和不同浓度的 PEG-6000 溶液（刘博等，2015），放置在设置为变温（12 ℃ 12h/24 ℃ 12h）、15 ℃、20 ℃、25 ℃ 的温度箱中，设置 12 h 光照。共 20 个处理，每处理 50 粒种子， 3 个重复。

1.2.5 测定指标

从种子放入温度箱开始，每隔 24 h 对各培养皿中的种子进行观察记录，以肉眼看到的白色幼根为标准来判断种子是否萌发，持续观察一个月，记录每天的萌发种子数量。

1.2.6 数据处理与分析

通过记录的数据，对每种处理种子的发芽率、发芽势和发芽指数进行计算，计算公式如下：

发芽率：

式中 *Ga* 为发芽种子数，*Gn* 为试供种子数；

发芽势：$$\mathrm{Ge} = \frac{Gmax}{Gn} \times 100\,\%$$

式中 *Gmix* 为发芽数量最多日的发芽种子数，*Gn* 供试种子数；

发芽指数：$$\mathrm{Gi} = \sum \frac{Gt}{Dt}$$

式中 *Gt* 为与 *Dt* 相对应的每天发芽种子数，*Dt* 为发芽天数。

采用 Excel 软件记录转换数据，SPSS 22.0 软件进行数据统计分析，对不同温度和水分对水杉种子萌发指标的影响结果进行方差分析和 Duncan 法多重比较，Origin 2018 绘制统计

图。

2 结果与分析

2.1 不同温度与不同 PEG-6000 溶液浓度对水杉种子萌发的影响

表 1 不同温度与干旱胁迫对水杉种子萌发的影响

Table 1 Effects of different temperatures and drought stress on germination of *Metasequoia glyptostroboides* seeds

因素 Factor	发芽率 Germination rate	发芽势 Germination energy	发芽指数 Germination index
温度 Temperature	0.433	0.925	0.441
PEG-6000 溶液浓度 Solution concentrations of PEG-6000	0.043	0.043	0.014
温度 ×PEG-6000 溶液浓度 Temperature ×Solution concentrations of PEG-6000	0.000	0.009	0.001

由表 1 可见，水杉种子萌发指标在变温与其他温度处理下没有显著差异（P>0.05），在不同 PEG-6000 溶液浓度下差异显著（P<0.05），水杉种子发芽率和发芽指数在不同温度与不同 PEG-6000 溶液浓度的交互作用下差异极显著（P<0.001），发芽势差异显著（P<0.05）。

2.2 不同温度对水杉种子萌发的影响

由图 1 可见，在相同的 PEG-6000 溶液浓度下，不同温度下水杉种子发芽率没有显著差异（P>0.05）、发芽势在 5 g mL^{-1} 和 15 g mL^{-1} 差异不显著（P>0.05），在 0 g mL^{-1} 和 10 g mL^{-1} 差异显著（P<0.05），发芽指数在 15 g mL^{-1} 时无显著差异（P>0.05），在 0 g mL^{-1}、5 g mL^{-1} 和 10 g mL^{-1} 时差异显著（P<0.05）。变温条件下水杉种子的平均萌发率最高，为 46.75%，显著高于温度为 15 ℃ 时的 34.75%。平均发芽势最高的为变温和 20 ℃ 温度条件下，为 21.25%，显著高于 15 ℃ 温度条件下的 11%，25 ℃ 条件下的平均发芽势与其他温度条件下的平均发芽势没有显著差异（P>0.05）。15 ℃ 温度条件下的平均发芽指数与变温和 20 ℃ 温度条件下的平均发芽指数差异显著（P<0.05），为最低（3.54）。平均发芽指数最高的是 20 ℃ 温度条件下的水杉种子（12.75），是 15 ℃ 温度条件下水杉种子平均发芽指数的 3.6 倍。

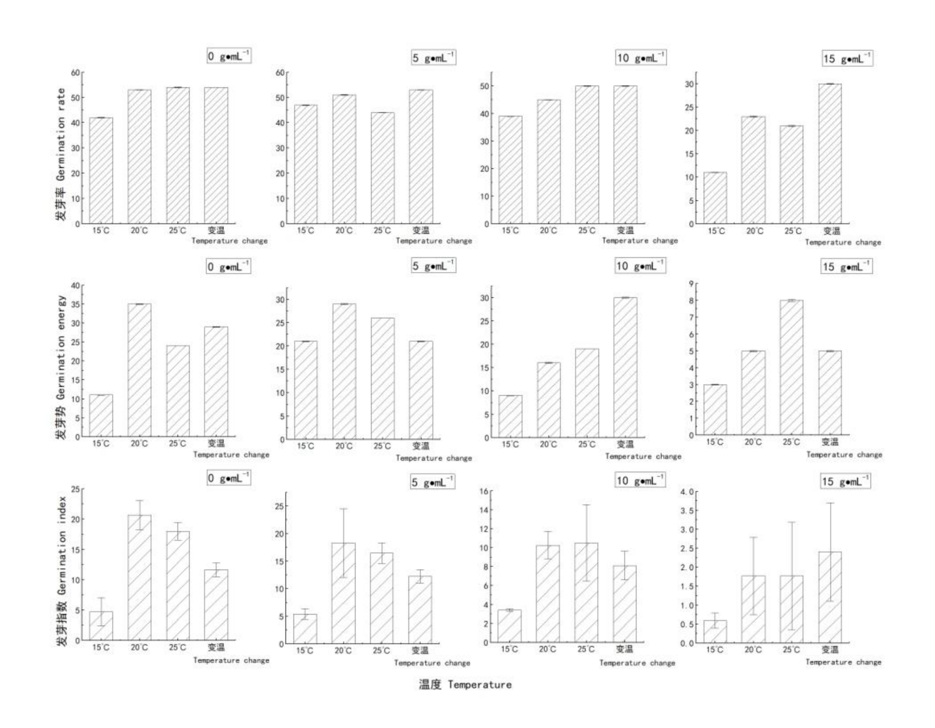


图 1 不同温度对水杉种子萌发的影响

Fig. 1 Effects of different temperatures on seeds germination of *Metasequoia glyptostroboides*

2.3 不同 PEG-6000 溶液浓度对水杉种子萌发的影响

研究发现，PEG-6000 溶液配制为 20 g mL^{-1} 时，水杉种子不萌发。由图 2 可见，水杉种子的发芽率、发芽势和发芽指数在不同 PEG-6000 溶液浓度处理下差异显著（$P<0.05$），且均随 PEG-6000 溶液浓度的增高而呈现出下降的趋势，下降趋势由缓变快。说明 PEG-6000 模拟的干旱胁迫在总体上对水杉种子的萌发有抑制作用，过度的干旱胁迫导致水杉种子活力丧失。随着 PEG-6000 溶液浓度上升，发芽指数的变化幅度最大，说明使用 PEG-6000 模拟干旱胁迫对发芽指数的影响程度最高，表明干旱胁迫越严重，水杉种子的活力指数越下降。

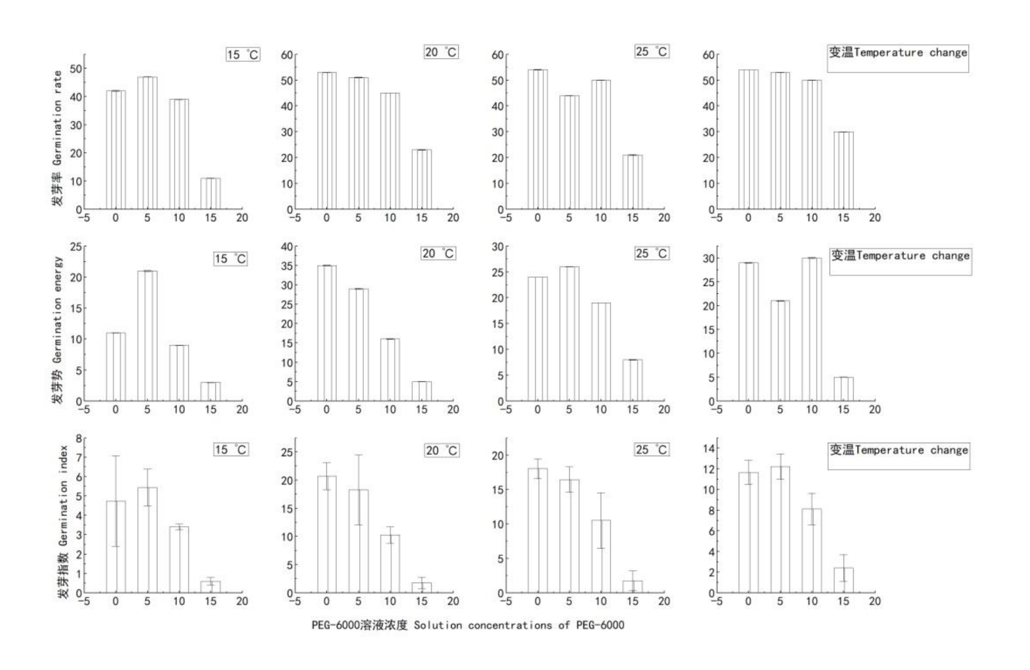


图 2 不同 PEG-6000 溶液浓度对水杉种子萌发的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of PEG-6000 solution on seeds germination of *Metasequoia glyptostroboides*

2.4 不同温度与不同 PEG-6000 溶液浓度的交互作用对水杉种子萌发的影响

由图 3 可见，不同温度与不同 PEG-6000 溶液浓度的交互作用对水杉种子萌发有极显著的影响（P＜0.001）。发芽率最高的是变温和 25 ℃ 温度条件下纯水对照组的水杉种子，为 54%，发芽率最低是 15 ℃ 温度条件下 PEG-6000 溶液浓度为 15%的水杉种子，为 11%。在变温和 25 ℃ 温度条件下，水杉种子的发芽率随着 PEG-6000 溶液浓度梯度的增大而下降。而在 15 ℃ 温度条件下，5 g mL^{-1} 的 PEG-6000 溶液浓度的发芽率显著高于其他组，为 47%。在 25 ℃ 温度条件下，发芽率最高的是纯水对照组，为 54%，PEG-6000 溶液浓度为 10 g mL^{-1}（50%）高于 5 g mL^{-1} 浓度处理（44%）。发芽势最高的是 20 ℃温度条件下纯水对照组的水杉种子，为 35 %。在 20 ℃ 温度条件下，水杉种子发芽势随着 PEG-6000 溶液浓度的增高而下降。在 15 ℃ 和 25 ℃ 温度条件下，水杉种子发芽势最高都是在 5 g mL^{-1} 的 PEG-6000 溶液浓度处理下，分别为 21%和 26%，而在变温条件下，发芽势最高的是 10 g mL^{-1} 的 PEG-6000 溶液浓度处理下。发芽指数最高的是 20 ℃ 温度条件下纯水对照组的水杉种子，为 20.7，在 20 ℃ 和 25 ℃ 温度条件下，发芽指数随着 PEG-6000 溶液浓度的增高而下降，而在变温和 15 ℃ 温度条件下，发芽指数最高的为 5 g mL^{-1} 的 PEG-6000 溶液浓度处理。以上研究结果说明，在水杉种子能够发芽的温度范围内，当温度偏低或是偏高的时候，适当的进行干旱胁

迫有利于激发水杉种子活力，促进萌发。

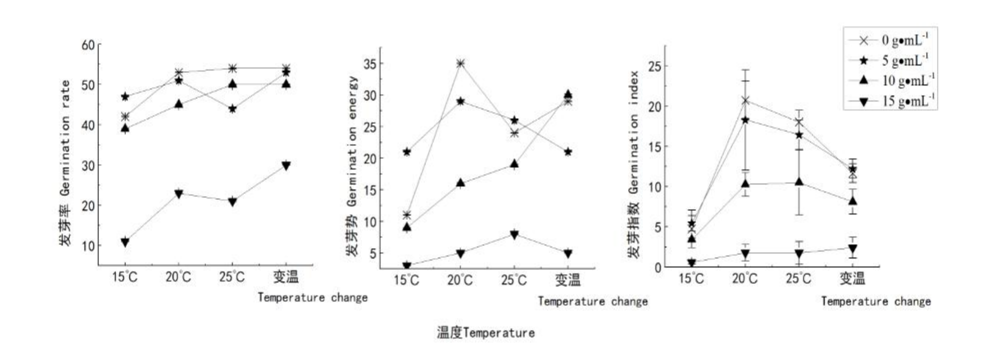


图 3 温度与 PEG-6000 溶液浓度对水杉种子萌发的交互作用

Fig.3 Interaction between temperature and solution concentration of PEG-6000 on seed germination of *Metasequoia glyptostroboides*

3 讨论

成功的天然更新必须具备充足且有生命力的种子，适合种子萌发、支持幼苗成活和幼树正常生长的环境条件，其中任何一个环节出现问题都会使天然更新发生障碍（李媛媛，2006）。水杉母树产种量低，且呈现出“丰-平-歉-歉”的变化趋势（王希群，1994），产种量不稳定，且水杉种子在大田里发芽率仅为 18%（尤冬梅等，2008），说明水杉种群天然更新存在种源不足、种质差的缺陷。因此，适合种子萌发、支持幼苗成活和幼树正常生长的环境条件对于水杉种群天然更新复壮就显得尤为重要。近年来，水杉原生地环境对水杉原生种群天然更新的影响受到关注和重视，水杉原生母树天然更新困难的障碍因素一直是近年来研究的热点，有关的学术研讨会议中，一般认为，导致水杉原生种群天然更新障碍的主要因素是林下活地被物、枯落物和人为干扰（如林下种植黄连）等。尤冬梅等 2008 年探究了枯落物对水杉种子萌发和幼苗生长的影响，发现水杉种子质量轻，难以通过厚积的枯落物接触到土壤，影响了水杉种子的萌发，验证了枯落物是影响水杉种子正常萌发的重要障碍因素（尤冬梅和马广礼，2008）。林勇等 2017 年探究水杉原生母树的种群结构与动态，发现水杉原生母树很多生长在人们的房前屋后、道路旁边等，受到人为剔枝、大量采种的影响，人为干扰严重，因此认为人为活动也是影响水杉原生种群天然更新困难的重要因素（林勇等，2017）。郭秋菊等 2018 年结合水杉原生地硒元素含量高这一因素，探究不同的亚硒酸钠溶液浓度对水杉种子萌发指标的影响，发现低浓度的亚硒酸钠溶液（0 ~ 0.25 g mL^{-1}）对水杉萌发有促进作用，高浓度的亚硒酸钠溶液（0 ~ 0.25 g mL^{-1}）对水杉萌发有抑制作用（郭秋菊等，2018）。因此，水杉原产地硒元素含量对水杉种子的萌发有重要影响。本研究结果显示水杉种子平均萌发率

最高的是在变温处理下，说明水杉原生地春季低温并不是造成水杉种子难以萌发的因素。在 15 ℃的温度条件下，发芽率、发芽势和发芽指标均呈最低，说明低温抑制了水杉种子的萌发。

PEG-6000 因分子量大，不易进入植株细胞内等特性，被广泛用于抗旱研究领域（刘博等，2015）。研究发现 PEG-6000 模拟的干旱胁迫对水杉种子的萌发率有抑制作用，当浓度＞20 g mL^{-1} 时，水杉种子不再萌发，这与张翠仙等对芒果种子萌发的研究结果一致（张翠仙等，2019）。在 15 ℃时，5 g mL^{-1} 的 PEG-6000 溶液对水杉种子的发芽率和发芽势有促进作用。在变温处理下，10 g mL^{-1} 的 PEG-6000 溶液下水杉种子的发芽势和 5 g mL^{-1} 浓度下的发芽指数显著高于其他处理。在 25 ℃时，5 g mL^{-1} 的 PEG-6000 溶液能够促进水杉种子的发芽势。低浓度的 PEG-6000 溶液对水杉种子萌发有一定的促进作用，这与王沛琦等 PEG-6000 溶液模拟干旱胁迫对红花种子萌发的影响研究结果一致（王沛琦等，2019）。发芽势可以评价种子的发芽速度和发芽整齐度，发芽指数是种子的活力指标，因此可以认为 PEG-6000 模拟的干旱胁迫在温度偏高或是偏低时，可以增强发芽速度和发芽整齐度。

种子的萌发常常被看作是种子植物生命周期的开始，种子的萌发率和萌发速率受环境条件的影响，其中温度和光照是很重要的影响因素（辛霞等，2004）。水杉原生种群产种量低且不稳定、自然状态下种子发芽率低、幼苗生长环境不良等问题严重限制了水杉天然更新。因此，采用人工技术提高水杉种子萌发率对于水杉种群更新具有重要作用。本研究在实践调查的基础上，发现水杉原生种群缺少实生幼苗和幼树，因此，要促进水杉种群的更新复壮，就需要用到人工技术来辅助水杉繁殖，利用有限的种子，提高其萌发率，能够为水杉种群壮大幼苗库，辅助其自然更新。本研究所得出的结论结合前人学者的研究结果，能够为水杉原生种群的天然更新困难的障碍因素进行一些论证，对水杉人工繁殖技术提供一定的实践指导意义。但本研究结果是在一定的实验条件下得出的，有一定的局限性，水杉原生种群的天然更新困难的障碍因素需要更进一步的探究和发展。

4 结论

本研究通过基础调查和设置实验，结果显示在 24 h 内 12 ℃和 24 ℃交替进行的变温条件下，水杉种子的平均萌发率和平均发芽势均为最高，分别为 46.75%和 21.25%，因此认为水杉母树原生地春季低温并未对水杉种子萌发造成抑制作用，同时在原生地野外环境下进行水杉种子萌发和幼苗生长特性探究，发现 3 个月内水杉幼苗平均存活率达到 70%以上，其中存在霉害作用和密度效应，因此也可以认为原生地春季低温未对水杉幼苗的生长造成严重

的负面影响。研究还发现，PEG-6000 溶液模拟干旱胁迫过程中，当温度偏低或是偏高时，低浓度的 PEG-6000 溶液（5 ~ 10 g mL^{-1}）对水杉种子发芽势和发芽指数有促进作用。因此，在进行水杉栽培繁殖过程中，可以采用适当浓度的 PEG-6000 溶液来促进种子发芽和出苗整齐，浓度一般为 5~10 g mL^{-1} 为宜。

参考文献：

BOAVIDA LC, VIEIRA AM, JÖRG D BECKER, et al., 2005. Gametophyte interaction and sexual reproduction: How plants make a zygote[J]. InternatJ DevBiol, 49(5-6):615.

CHANEY RW, 1948. The bearing of living Metasequoiaceae on problems of Tertiary paleobotany[J]. Proc Natl Acad USA, 34: 415-503.

CHEN YF, 2012. Reserach of natural regeneration barrier of forest[M]. World forestry Research.vol.25 no.2 Apr.

CUI MY, 2011. *Metasequoia glyptostroboides*: Introduction of artificial populations and viability analysis of natural populations[D]. Shanghai: East China Normal University. [崔敏燕, 2011. 濒危物种水杉种群的引种和生存力分析[D]. 上海：华东师范大学.]

FILLING EG, 1976. Metasequoia-fossil and living. Bot. Rev., 42: 215-315.

GUO QJ, DENG ZZ, WANG ZM, 2018. Influences of different sodium selenite concentrations on seed germination of Metasequoia glyptostroboides [J]. Guihaia, 38(10):1319-1325.[郭秋菊,邓桢珍, 王志鸣, 2018. 不同浓度对亚硒酸钠溶液对水杉种子萌发的影响[J]. 广西植物, 38(10):1319-1325]

HU XX, ZHENG WJ, 1948. *Metasequoia* and its new species of *Metasequoia*[J]. Static report, 1: 16-161.[胡先骕, 郑万钧, 1948. 水杉新科及生存之水杉新种[J]. 静生汇报,1: 16-161]

HU SY, 1980. The Metasequoia flora and its phytogeographic significance[J]. J Arnold Arbor, 6: 41-94.

IUCN red list, 201. Categories & Criteria (version 3.1). Available at https://www.iucn.org/

JING DL, LIANG HW, WANG YB, et al., 2011. Influence of Different Light and Storage Temperature on Germination Rate and Enzyme Activities of *Metasequoia glyptostroboide* Seeds[J]. Hubei Agricultural Sciences, 50(19):3980-3983.[景丹龙,梁宏伟,王玉兵,等. 2011.不同光照及储藏温度对水杉种子萌发及酶活性的影响[J].湖北农业科学, 50(19):3980-3983.]

KWEI-LING CHU, WILLIAM SC, 1950. An Ecological Reconnaissance in the Native Home of *Metasequoia Glyptostroboides*[J]. Ecology, 31(2): 260-278.

LI JH, BAN JD, 1989. Specialty populations of *Metasequoia Glyptostroboides* in China [J]. J Henan Norm Univ（Nat Sci Ed）, (4):49-55. [李建华, 班继德, 1989. 中国特产的水杉群落[J]. 河南师范大学学报（自然科学版）, (4):49-54]

LI SX，YAO YL, DAI XG, et al., 2012. Effects of environmental conditions and covering soil after

sowing on seedling emergence rate of *Metasequoia glyptostroboides* [J]. J Cent S Univ For Technol, 32(2):26-30.[李淑娴，姚亚莉，戴晓港，等, 2012. 环境条件和播后覆土对水杉种子出苗率的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 32(2):26-30.]

LI YY, 2006.Phylogenetic position and recovery assessment of *Metasequoia glyptostroboides*[D]. Shanghai: East China Normal University. [李媛媛, 2006.水杉的系统发育地位及恢复评价[D]. 上海：华东师范大学]

LIAO SZ, ZHOU WL, 1989. Germination condition test of *Metasequoia* seeds Journal of Sichuan Forestry Science and Technology[J]. J Sichuan For Scie Technol, (01):71-74.[廖绍忠，周万良, 1989. 水杉种子发芽条件试验[J]. 四川林业科技, (01):71-74.]

LIN Y, AI XR, YAO L, et al., 2017. Population structure and dynamics of *Metasequoia glyptostroboides* parent trees[J]. Chin J Ecol, 36(06):1531-1538.[林勇，艾训儒，姚兰，等, 2017. 水杉原生母树种群结构与动态[J]. 生态学杂志, 36(06):1531-1538.]

LIU B, WEI L, XIAO JH, et al., 2018. Study on the characters of seed germination in soybean under drought stress simulated by polyethylene glycol (PEG) [J]. Seed, 37(12):56-60.[刘博，卫玲，肖俊红，等, 2018. PEG 模拟干旱条件下大豆萌发特性研究[J]. 种子, 37(12):56-60.]

LIU YP, 2015. Regeneration limitation in the natural populations of endangered *Metasequoia glyptostroboides* [D]. Shanghai: East China Normal University. [刘玉配.2015.濒危物种水杉（*Metasequoia glyptostroboides*）自然种群的更新限制研究[D]. 上海：华东师范大学]

RAIZADA MB, 1953. The Redwood of China (*Metasequoia Glyptostroboides* Hu et Cheng) [J]. Indian Forester, 79(3).

WANG PQ, LIU XY, HU ZH, et al., 2019. *Safflower* seed at germination stage: Identification and evaluation of drought resistance[J/OL]. Chin Agric Sci Bull, (20):1-5 [王沛琦，刘旭云，胡尊红，等, 2019. 红花种子萌发期抗旱性鉴定与评价[J/OL]. 中国农学通报, (20):1-5] [2019-05-29].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1984.S.20190425.1438.002.html

WANG XQ. 1994. Production route of *Metasequoia* seeds[J]. Seed, (1):41[王希群, 1994. 水杉种子的生产途径[J]. 种子, (1):41.]

WEI JL, LIU FM, 2018. Study on natural regeneration barriers of rare and endangered tree species of *Erythrophleum fordii*[J]. For Invent Plann, 4(43) :8.

XIN X, JING XM, SUN HM, et al., 2004. Ecophysiological characteristics of seed germination of the relict plant *Metasequoia glyptostroboide*[J]. Biodivers Sci, (6):572-577.[辛霞，景新明孙红梅，等, 2004. 孑遗植物水杉种子萌发的生理生态特性研究[J].生物多样性, (6):572-577.]

YOU DM, MA GL, 2008. Effects of different litter layer depth on seed germination of *Metasequoia glyptostroboides*[J]. J Nanyang Norm Univ, (6):51-53.[尤冬梅，马广礼, 2008. 水杉枯落物对其种子萌发的影响初探[J]. 南阳师范学院学报, (6):51-53.]

YOU DM, 2008. The effects of environmental factors on seed germination and seedling growth of

Metasequoia glyptostroboides [D]. Wuhan：Central China Normal University. [尤冬梅, 2008. 环境因子对水杉种子萌发与幼苗生长的影响研究[D]. 武汉：华中师范大学]

ZHANG CX, BAI TQ, XIE HD, et al., 2019. Effects of PEG-6000 simulation drought stress on seed germination of mango (*Mangiferca indica* L.) [J]. J Southern Agric, 50(3):600-606. [张翠仙，柏天琦，解德宏，等, 2019. PEG-6000 模拟干旱胁迫对芒果种子萌发的影响[J]. 南方农业学报, 50(3):600-606.]

ZHANG H, WANG JN, WANG JY, et al., 2018. Tree stoichiometry and nutrient resorption along a chronosequence of *Metasequoia glyptostroboides* forests in coastal China[J]. For Ecol Manag, 4(430): 11.

ZHANG L, 2011. Research on the seed germination and seedling growth characteristics of *Metasequoia glyptostroboides*[D]. Wuhan：Central China Normal University. [张岚, 2011. 水杉种子萌发和幼苗生长特性的研究[D]. 武汉：华中师范大学]